

## Developing N<sub>2</sub>O Emission Factor in Red Pepper Fields to Quantify N<sub>2</sub>O Emission of Agricultural Field

Gun-Yeob Kim\*, Woo-Kyun Park, Jong-Sik Lee, Hyun-Cheol Jeong, Sun-il Lee, Eun-Jung Choi, Pil-Joo Kim<sup>1</sup>, and Young-Ho Seo<sup>2</sup>

*National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju, 565-851, Korea*

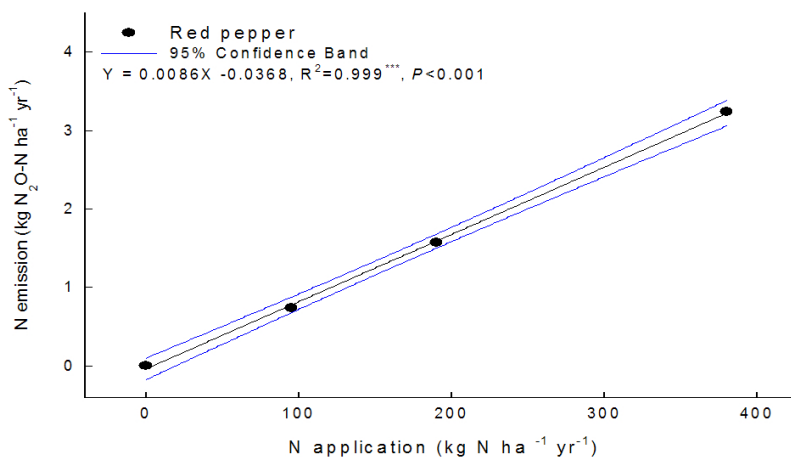
<sup>1</sup>*Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea*

<sup>2</sup>*Gangwondo Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon, 200-939, Korea*

(Received: December 4 2014, Revised: December 23 2014, Accepted: December 23 2014)

The level of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), a long-lived greenhouse gas, in atmosphere has increased mainly due to anthropogenic sources, especially application of nitrogen fertilizers. Quantifying N<sub>2</sub>O emission in the agricultural field is essential to develop National inventories of greenhouse gases (GHGs) emission. The objective of this study was to develop emission factor to estimate direct N<sub>2</sub>O emission from agricultural field by measuring N<sub>2</sub>O emissions in the red pepper cultivating field from 2010 to 2012. Emission factor of N<sub>2</sub>O calculated from accumulated N<sub>2</sub>O emission, nitrogen fertilization rate, and background N<sub>2</sub>O emission was  $0.0086 \pm 0.00043$  kg N<sub>2</sub>O-N kg<sup>-1</sup> N resulted from three year experiment of the research sites. More extensive studies need to be conducted to develop N<sub>2</sub>O emission factors for other upland crops in the various regions of Korea because N<sub>2</sub>O emission is influenced by many factors including climate characteristics, soil properties, and agricultural practices.

**Key words:** N<sub>2</sub>O emission factor, Nitrous oxide emission, Red pepper field



**Relationships between the averaged N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen fertilizer application rates during pepper cultivation in upland soil from 2010 to 2012.**

\*Corresponding author : Phone: +82312900240, E-mail: gykim1024@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ010036)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

## Introduction

농경지에서  $N_2O$ 는 토양에 질소질 비료와 가축분뇨를 투입했을 때, 토양 미생물에 의해 질산화 과정과 탈질 과정을 일으키는 동안 발생된다 (Freney, 1997; Singh, 2009). 질산화 과정은 무기질 비료와 퇴비에 들어있는 암모니아가 호기 조건에서 질산으로 산화되는 반응이며, 탈질 과정은 질산이 혐기 조건에서 아산화질소나 질소 가스로 환원되는 반응이다. 농경지에서의  $N_2O$  발생량은 질소 시비량, 토양 유기물 함량, 토양 산도, 토성, 작물의 종류, 양분원의 종류 등에 따라 다르다 (Stehfest, 2008).

2006 IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) 가이드라인에는 농경지에서 온실가스 배출량을 산정하는 방법을 크게 Tier 1, 2, 3로 구분하고 있다 (IPCC, 2006). Tiers는 방법의 복잡성 정도를 나타내는 것으로서, 방법론의 선택은 배출계수 (emission factor) 및 활동자료(activity data) 확보수준에 따라 달라질 수 있다. 농경지 중 벼논이 거의 없거나, 혹은 우리나라와 같이 국가고유의 배출계수가 아직 준비되어 있지 않을 경우에는 Tier 1 방법으로  $N_2O$  배출량을 산정할 수 있다. 이때는 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는  $N_2O$  배출계수와 활동자료 등을 활용하여 연간  $N_2O$  배출량을 산정할 수 있다 (IPCC, 2006). 이와는 상대적으로 Tier 2 수준에서는 각국의 기상, 토양환경이 다르기 때문에 그 나라 환경에 맞게 개발한 고유  $N_2O$  배출계수와 활동자료를 활용하여 정확한  $N_2O$  배출량을 산정한다. Tier 3은 Tier 2 보다 더 높은 정확도를 갖는 배출계수이며, 상당부분 시험·분석을 통하여 개발한 매개변수 값을 활용한다. 온실가스 배출 통계작성의 복잡성 및 정확성은 Tier 3로 갈수록 높다. Tier 2 이상의 작성방법은 국가고유의 작성방법으로 간주된다.

우리나라는  $N_2O$ 의 국가 고유 배출계수가 설정되어 있지 않으므로, IPCC에서 제시한 임의 값은 0.0125 kg  $N_2O$ -N/N kg (1996년 가이드라인)과 0.01 kg  $N_2O$ -N/N kg (2006 가이드라인)을 이용하여  $N_2O$ 의 발생량을 추정하고 있다. 즉, 농경지에 뿌린 무기질 비료나 가축분 퇴·액비의 질소 가운데 휘산되지 않고 남은 부분의 1.25% 또는 1%가  $N_2O$ 로 직접 대기에 배출된다는 것이다. 국가 고유 배출계수는 그 나라의 토양, 기후, 농사 기술과 재배환경 등을 반영하므로, IPCC의 임의 계수보다 그 나라 배출량의 불확도를 줄이면서 정확하게 추정할 수 있다.

지금까지 고추재배 토양에서 국가 고유 배출계수를 개발하지 못하여 IPCC에서 부여하는  $N_2O$  임의계수 값을 적용하기 때문에 국가 온실가스 배출량이 과대평가가 될 우려가 있었다. 따라서 본 연구는 더욱 정밀한 온실가스 인벤토리 작성을 위하여 질소 비료 사용량에 따라  $N_2O$  배출 특성을 3년 (2010~2012년)간 조사하여 우리나라 국가 고유  $N_2O$  배출계수를 개발하고자 하였다.

## Materials and Methods

먼저  $N_2O$  배출계수 개발의 이론적 배경을 살펴보면, 2006 IPCC 가이드라인 (IPCC, 2006)에 따라 밭에서  $N_2O$  총 배출량은 아래의 식 1과 같이  $N_2O$  직접배출량에서  $EF_1$  (배출계수)을 개발해야한다.

$$N_2O-N_{input} = [(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_1] + [(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR}^* \times EF_{1FR}] \quad (1)$$

여기서,  $F_{SN}$  : 화학비료로 공급되는 질소량 (kg N/yr)  
 $F_{ON}$  : 축산분뇨로 배설되는 양을 유기질비료로서 농경지에 투입된 질소량 (kg N/yr)  
 $F_{SOM}$  : 무기질 토양의 무기화에 의해 공급되는 질소량 (kg N/yr)  
 $F_{CR}$  : 토양으로 환원되는 작물 잔사에 의해 공급되는 질소량 (kg N/yr)  
 $EF_1$  : 밭 토양에서 아산화질소 직접 배출계수 (kg  $N_2O$ -N/kg 투입)  
 $EF_{1FR}$ : 벼논에서 질소사용으로 배출되는 아산화질소 배출계수 (kg  $N_2O$ -N/kg N) ( $F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR}^*$  : 벼논에 해당

고추밭 토양에서  $N_2O$  배출량을 정확하게 산정하기 위해서는 1차적으로 우리나라 밭 재배환경 하에서  $N_2O$  고유 배출계수 ( $N_2O$ - $N_{input}$ )의 설정이 선행되어야 한다.

본 시험은 우리나라 고추밭 토양의 고유  $N_2O$  배출계수를 설정하기 위해, 아래 Table 1에서와 같이 강원도 춘천, 경기도 수원 및 충청남도 예산 등 3지역을 고추재배 조사포장으로 선정하였다. 3지역 모두 2009년 포장을 설치하였으며 2010년부터 2013년까지 고추재배 시험포장에서  $N_2O$ 를 포집·분석하였다.

시험 토양은 수원시에 위치한 국립농업과학원 기후변화생태과 고추밭은 고평통 미사질 식양토 (37°15'27.68"N, 126°59'16.05"E)로 유기물 함량이 15.2 g  $kg^{-1}$  그리고 인산이 362.2 mg  $kg^{-1}$ , 암모니아태 질소 8.3 mg  $kg^{-1}$ 와 질산태질소 8.1 mg  $kg^{-1}$ 였다. 춘천시에 위치한 강원도농업기술원의 고추밭 시험포장 (춘천, N 37° 57' 15.9" E 127° 46' 26.6")은 용계통 사질식양토로서 유기물 함량이 16.0 g  $kg^{-1}$  그리고 인산이 547.2 mg  $kg^{-1}$ , 암모니아태 질소 4.2 mg  $kg^{-1}$ 와 질산태질소 3.6 mg  $kg^{-1}$ 이었다. 그리고 예산읍에 위치한 충남 농업기술원 고추밭 시험포장은 예산통 양토로서 유기물 함량이 31.0 g  $kg^{-1}$  그리고 인산이 554.1 mg  $kg^{-1}$ , 암모니아태 질소 8.6 mg  $kg^{-1}$ 와 질산태질소 7.4 mg  $kg^{-1}$ 이었다. 공시품종은 수원에서는 마니파, 춘천과 예산지역은 독야청청이었으며 재식거리는 3지역 모두 60 (이랑거리)×40 cm (포기거

**Table 1. Chemical properties of soil before experiment at 3 different sites.**

Parameter	Investigation site		
	Suwon	Chuncheon	Yesan
Soil series	Gopyeong	Yonggye	Yesan
Soil texture	SICL	SCL	L
pH (1:5 with H <sub>2</sub> O)	6.6	6.4	6.7
EC (dS m <sup>-1</sup> )	0.3	0.2	1.4
OM (g kg <sup>-1</sup> )	15.2	16.0	31.0
Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	362.2	547.2	554.1
NH <sub>4</sub> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	8.3	4.2	8.6
NO <sub>3</sub> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	8.1	3.6	7.4
Exch. Cation (cmolC kg <sup>-1</sup> )			
K	0.6	0.5	1.1
Ca	5.8	5.2	6.1
Mg	5.2	1.4	1.4
Sampling site (GPS reading)	N 37°15'27.68", E 126°59'16.05"	N 37°57'15.9", E 127°46'26.6"	N 36°44'15", E 126°49'07"

**Table 2. Gas Chromatographic analysis conditions for N<sub>2</sub>O measurement**

Detector		ECD
Column	Packing material	Porapack Q(80/100)
	Materials	Stainless steel
	O.D. x length	1/8" x 2m
Carriger gas		N <sub>2</sub>
Flow rate		30 ml/min (Carrier+make up)
Temperature	Column	70°C
	Injector	80°C
	Detector	320°C
Retention time		3.2 min
Concentration of calibration gas		0.5 and 1.0 ppmv N <sub>2</sub> O in N <sub>2</sub>
Loop		2 ml

리)로 정식하였다.

비료 사용량은 각 작물의 표준 시비량을 기준으로 하였으며, 3지역 모두 NPK 처리의 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 190-112-149 kg ha<sup>-1</sup>이며 질소비료 처리는 수원에서는 0배, 1배, 2배, 춘천은 0배와 1배 그리고 예산지역은 0배, 0.5배, 1배, 2배로 사용하였다. 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (2006)의 표준시비방법에 준하였으며, 질소는 요소를 2회 분시, 인산은 용성인비로 전량 기비, 칼리는 염화칼리를 1회 분시 하였다.

N<sub>2</sub>O 배출 플럭스를 조사하기 위해 국제적으로 공인된 밀폐 형태 챔버인 steady-state를 사용하였다 (Hutchinson, 1993). 설치된 chamber는 외부로의 공기 유출이 없도록 하였으며, 지름이 0.25 m, 높이가 0.5 m인 PVC 소재로 각 시험구의 대표 지점에 안정적으로 설치하였다. 가스시료 채취는 Yagi

등 (1991)의 방법에 의하여 10:00~13:00시 사이에 60 ml 주사기로 1주일에 2회 채취하여 분석하였다.

채취한 공기 시료의 N<sub>2</sub>O 기체농도는 10 port와 4 port valve를 장착한 GC-ECD (Varian 3800)를 사용하였고 column은 Porapack Q (80/100 mesh)를 충전한 1/8"×2 m의 stainless steel tubing column, 그리고 Detector의 온도는 320°C로 하였다. N<sub>2</sub>O 분석 조건은 Table 2와 같다.

플럭스는 다음 식에 따라서 계산 (F: mg m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>) 하였다.

$$F = \rho V A^{-1} \Delta c \Delta t^{-1} \cdot 273 T^{-1} \quad (2)$$

$\rho$ 는 가스밀도 (mg m<sup>-3</sup>), A는 chamber 바닥면적 (m<sup>2</sup>), V는 chamber 내 공기체적 (m<sup>3</sup>),  $\Delta c \Delta t^{-1}$ 는 chamber내 가스농도의 평균 증가속도 (10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> hr<sup>-1</sup>), T는 chamber 내 평균기온 (K) N<sub>2</sub>O  $\rho$ 값 (T=273 K)은 다음과 같다.

$$\rho_{N_2O} = 1.96, \rho_{N_2O-N} = 1.25 \quad (3)$$

IPCC에서는 불확도 (Uncertainty) 평가를 통해 생산 자료의 신뢰성 확보를 요구하고 있다 (IPCC, 2006). 우리나라 고추밭 토양에서 N<sub>2</sub>O 배출계수를 구하기 위하여 3년간 전국 3개 지역에서 조사된 N<sub>2</sub>O 배출계수의 정규분포 95% 신뢰구간을 산정하였고, 본 신뢰구간의 절대 값을 평균 배출계수로 나누어 자료의 불확도 (%)를 평가하였다 (SRI report, 2011).

## Results and Discussion

N<sub>2</sub>O 배출량 변화는 조사지역별 조사 연차와 관계없이 일정한 변화 양상을 보였다 (Fig. 1). 고추 생육초기에 질소 비

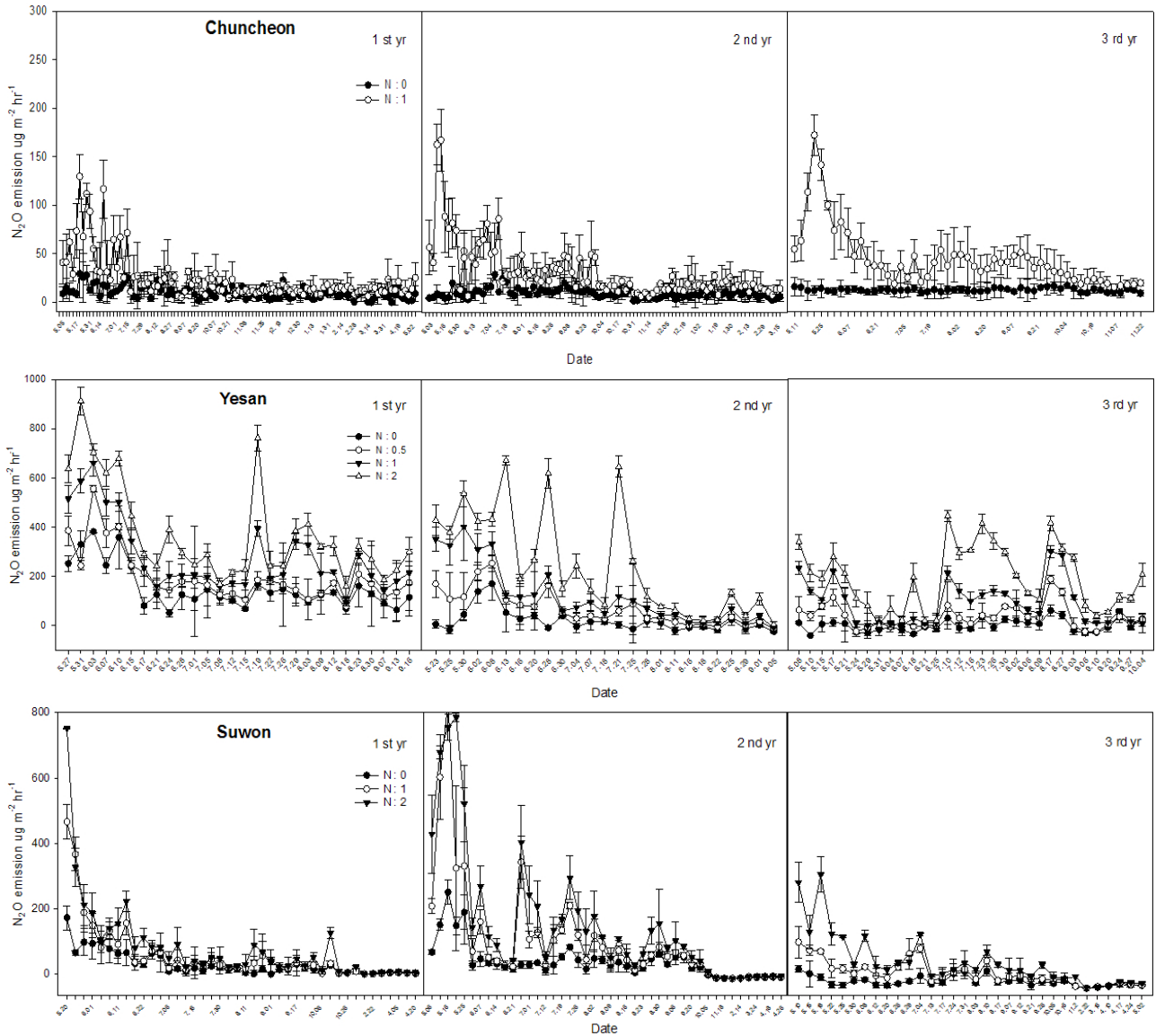


Fig. 1. N<sub>2</sub>O emission patterns in pepper soils located at 3 different sites treated by N fertilizer levels.

료에 의해 N<sub>2</sub>O 배출량이 빠르게 증가하였으며, 여름철 7~8 월 사이에도 소폭의 증가를 보였다. 특히 충남 예산지역에서는 생육초기 뿐만 아니라 7월에도 배출 증가를 보였고, 타 지역 보다 N<sub>2</sub>O 배출이 많았다. 3개 지역 N<sub>2</sub>O 배출량은 시간이 지남에 따라 크게 감소하여 수확기와 수확 후 기간 까지 낮은 배출을 유지하였다.

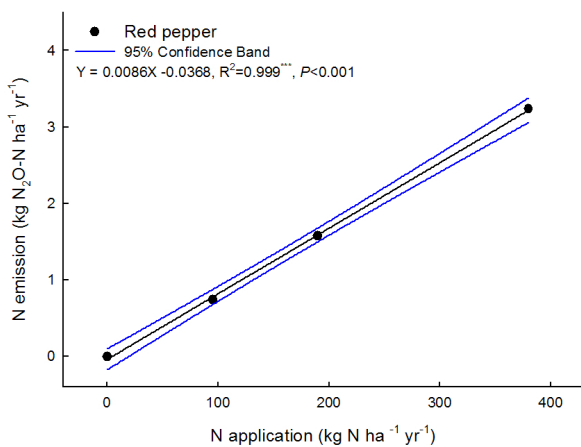
조사지역에 따라 강수량과 기온 등의 재배환경 차이로 인해 고추 수량에 다소 간 차이가 있었다 (Table 3). 토양온도와 토양수분에 영향이 미치는 강수량은 다른 지역에 비해 예산에서 높았으며 이는 N<sub>2</sub>O 배출 양상에도 영향이 미친 것으로 보인다. N<sub>2</sub>O 배출 양상은 토양온도와 토양수분 변화와는 밀접한 경향이 있으며 토양온도와 토양수분이 증가할수록 N<sub>2</sub>O 플럭스가 증가된다고 하였다 (Kim 2008; Sozanska, 2002; Conen, 2000; Dobbie, 1999; Mahmood, 1998; Clayton, 1997). Arone 등 (1998)은 N<sub>2</sub>O 배출량과 토양 수분함량과는

정의 상관관계가 있다고 하였으며, Dobbie 등(1999)은 남부 스코틀랜드의 N<sub>2</sub>O 배출량이 조사지역과 기후 차이에 관계 없이 토양수분과 밀접한 관계가 있다고 하였다. Sozanska 등 (2002)은 토양수분에서 액상과 기상부분을 고려한 WFPS (Water Filled Pore Space)가 80~85%에서 N<sub>2</sub>O 배출이 최대가 되고, 토양 수분과 토양온도가 증가함에 따라 배출도 증가한다고 하였다.

3개 지역에서 N<sub>2</sub>O 배출과 질소비료 사용량을 회귀분석한 결과 (Fig. 2)에 나타난바와 같이 사용량이 많을수록 배출량이 증가하였으며, 질소비료 사용량에서 99.9%로 N<sub>2</sub>O 배출의 경시적 변이를 설명할 수 있었다. N<sub>2</sub>O 배출량과 질소비료 사용량의 상관은 0.999<sup>\*\*\*</sup> 로서 높은 상관관계를 보였다. 3개 지역 평균 N<sub>2</sub>O 배출계수는 0.0086 kg N<sub>2</sub>O-N/N kg으로 평가되어 IPCC default 값인 2006 가이드라인의 0.01 kg N<sub>2</sub>O-N/N kg과 1996 가이드라인의 0.0125 kg N<sub>2</sub>O-N/N kg

**Table 3. Comparison of climate condition and yield properties in upland soils located at 3 different sites during pepper cultivation.**

Parameter	Investigation site		
	Chyuncheon	Yesan	Suwon
1st year			
Mean air temperature (°C)	11.2	23.0	15.0
Mean soil temperature (°C)	22.1	23.6	22.0
Precipitation (mm)	128.0	219.0	148.0
Sun shine hour (hour)	171.7	164.7	186.8
yield (ton/ha)	1.8	7.4	4.5
2nd year			
Mean air temperature (°C)	10.9	22.4	13.6
Mean soil temperature (°C)	23.2	24.7	24.5
Precipitation (mm)	173.4	308.9	174.6
Sun shine hour (hour)	155.3	153.6	167.1
Grain yield (Mg/ha)	2.1	5.2	3.4
3rd year			
Mean air temperature (°C)	18.2	23.0	15.3
Mean soil temperature (°C)	23.6	25.2	21.8
Precipitation (mm)	154.2	203.6	165.6
Sun shine hour (hour)	170.6	184.3	197.9
yield (Mg/ha)	1.5	9.1	5.6

**Fig. 2. Relationships between the averaged N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen fertilizer application rates during pepper cultivation in upland soil from 2010 to 2012.**

보다 14.0~31.2%가 낮았다 (Table 4). 이때 조사 자료의 평균 오차범위 (error range)는 0.00817~0.00903 kg N<sub>2</sub>O-N/N kgN에 분포하였으며, 95% 신뢰구간에서 평가한 불확도 (uncertainty)는 5.0% 이었다. IPCC default 값은 Bouwman (1996)과 Mosier (1998)의 보고에 의하면 대부분 유럽과 미국의 목초지와 밭 토양의 NH<sub>4</sub>와 NO<sub>3</sub> 함량 자료를 참고하였고 아시아에서는 유일하게 일본 밭 토양 자료를 활용하여 0.0125와 0.01 kg N<sub>2</sub>O-N/N kg을 결정하였다. 그리고 대부분 밭 토양보다 질소비료 사용량이 많은 목초지가 많아서

**Table 4. Comparison of N<sub>2</sub>O emission (N kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) and average N<sub>2</sub>O emission factor in upland soils located at 3 different sites during pepper cultivation treated by N fertilizer levels.**

N fertilizer	N <sub>2</sub> O emission	Average N <sub>2</sub> O emission factor	Average error range*
kg ha <sup>-1</sup>	N <sub>2</sub> O kg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	kg N <sub>2</sub> O-N/N kg	kg N <sub>2</sub> O-N/N kg
95	0.707		
190	1.450	0.0086	0.00817~0.00903
380	2.937		

Note) \*Error range within 95% confidence intervals.

배출계수 값이 높은 것으로 판단된다.

## Conclusions

우리나라 고추밭 토양에서 N<sub>2</sub>O 배출계수를 산정하기 위해, 전국 3개 지역에서 고추생육 및 수확 후 월동기간을 포함한 3년 동안 N<sub>2</sub>O 배출량을 조사하였다. 3지역 모두 화학비료를 시비 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=190-112-149 kg ha<sup>-1</sup>)하였으며, 질소비료 처리는 수원에서 0배, 1배, 2배, 춘천은 0배와 1배 그리고 예산지역은 0배, 0.5배, 1배, 2배로 사용하였다. 연간 N<sub>2</sub>O 배출량은 ha당 95 kg 시용시 0.707 N<sub>2</sub>O kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, 190 kg 시용시 1.45 N<sub>2</sub>O kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 그리고 380 kg 시용시 2.937 N<sub>2</sub>O kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>였으며, 95% 신뢰구간 유효

오차범위 0.00817~0.00903 kg N<sub>2</sub>O-N/N kg에서의 불확도 (uncertainty)는 5.0%이었다. 우리나라 고추 재배 밭에서 연간 배출되는 N<sub>2</sub>O의 배출계수는 0.0086 kg N<sub>2</sub>O-N/N kg으로 평가되었다.

## References

- Arone, J.A., and P.J. Bohlen. 1998. Stimulated N<sub>2</sub>O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Oecologia*. 116:331-335.
- Bouwman, A.F. 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46, 53-70.
- Clayton, H., I.P. Mctagart, J. Parker, L. Swan, and K.A. Smith. 1997. Nitrous oxide emissions from fertilised grassland : A 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. *Biol. Fertil. Soils* 25:252-260.
- Conen, F., K.E. Dobbie, and K.A. Smith. 2000. Predicting N<sub>2</sub>O emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biology*. 6:417-426.
- Dobbie, K.E., I.P. Mctagart, and K.A. Smith. 1999. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crop and seasons; key driving variables; and mean emission factors. *J. Geophys. Res.* 104:26891-26899.
- Freney, J.R.. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49(1-3), 1-6.
- Hutchinson, G.L., and G.P. Livingston. 1993. Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. ASA Spec. Publ.* 55. P. 63-78.
- IPCC. 1996. Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.
- IPCC, 2006. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Kim, G.Y., B.H. Song, K.A. Roh, S.Y. Hong, B.G. Ko, K.M. Shim, and K.H. So. 2008. Evaluation of Green House Gases Emissions According to Changes of Soil Water Content, Soil Temperature and Mineral N with Different Soil Texture in Pepper Cultivation. *J. Soil Sci. Fert.* 399-407.
- Mahmood, T., R. Ali., K.A. Malik, and S.R.A. Shamsi. 1998. Nitrous oxide emissions from an irrigated sandy-clay loam cropped to maize and wheat. *Biol. Fertil. Soils.* 27:189-196.
- Mosier A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger, and O. van Cleemput. 1998. Closing the global atmospheric N<sub>2</sub>O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225-248.
- RDA (Rural Development Administration). 2006. Fertilizer recommendation standards for various crops, Sanglok-sa, 58-59.
- Singh, S.N. and L. Tyagi. 2009. Nitrous oxide: Sources, sinks and mitigation strategies. In Sheldon A. I., Barnhart E. P. (eds.): *Nitrous oxide emissions research progress*. Nova Science Publishers, Inc., New York, p. 127-150.
- Sozanska, M., U. Skiba, and S. Metcalfe. 2002. Developing an inventory of N<sub>2</sub>O emissions from British Soils. *Atmos. Environ.* 36:987-998.
- SRI (Statistical Research Institute). 2011. A study on uncertainty calculator of activity data-National GHGs emission statistics, 110-172 (in Korea).
- Stehfest, E. 2008. Modelling of Global Crop Production and Resulting N<sub>2</sub>O Emissions. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Germany.
- Yagi, K. 1991. Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment. 2. Methane emission from paddy fields. *Soil and Fert. Japan.* 62(5):556-562.